

第2章

MEMSミラー・アレイ構造で大規模光スイッチ装置を実現する

――ネットワーク・インフラへの光MEMSの応用

東原朋成

MEMS技術の応用事例として光MEMSスイッチを取り上げる．ネットワークにおける通信量増大の要求にこたえる一つの解決策として，光ネットワークの導入が進められている．そして，MEMS技術を利用したスイッチ・デバイスによって光信号のスイッチングを行う装置が実用化されている．ここでは，ミラー・アレイ構造をとる光MEMSスイッチを例に，その動作原理とスイッチングの際の制御方法について解説する．

（編集部）

ネットワークのトラフィック（通信量）は増加の一途をたどり，しかもそのペースは年々上がっています．この増え続ける通信量の要求を満たすために，昨今では例えばFTTH（fiber to the home；光ファイバが各家庭の入り口まで張り巡らされたネットワーク）などのインフラ整備が急ピッチで進んでいます．本稿では，MEMS（micro electro mechanical systems）の応用事例として，こうした光ネットワークにおける光スイッチの技術を紹介します．

本稿で取り上げる光スイッチ（photonic switch）は，多入力多出力（$M \times N$：M入力，N出力）のノンブロッキングでトランスペアレントなスイッチ[注1]です（**図1**）．ノンブロッキングとは，どのような二つの接続（入出力）のペアであっても，ほかの接続に影響を与えることなくスイッチングを変更できることを意味します．ノンブロッキングは，ネットワークのスイッチとして重要な要素です．一方，トランスペアレントとはスイッチングが伝送される情報（フォーマット，伝送ビット・レート，暗号化の有無など）と無関係であるということです．このことは，このタイプのスイッチがどのようなネットワークにも対応できることを意味します．**図2**に，通信網におけるノンブロッキング・トランスペアレント型スイッチの位置づけを示します．

1 光スイッチの原理

ここで説明するスイッチは，ファイバ・ツー・ファイバ

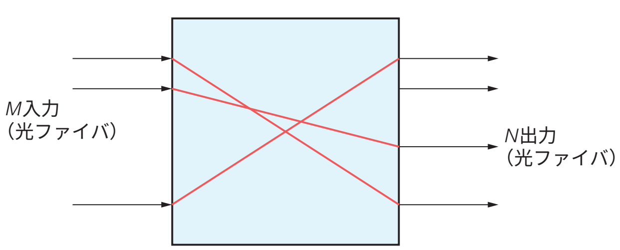


図1　多入力多出力ノンブロッキング・トランスペアレント型光スイッチ

ノンブロッキングとは，ペアの入出力がほかのスイッチ接続にまったく影響を与えることなく切り替えられることを意味する．また，トランスペアレントとは，光を光のままスイッチングするということで，どのような通信パケットのフォーマットや暗号化に対してもスイッチング可能であり，情報源に依存しないことを意味する．

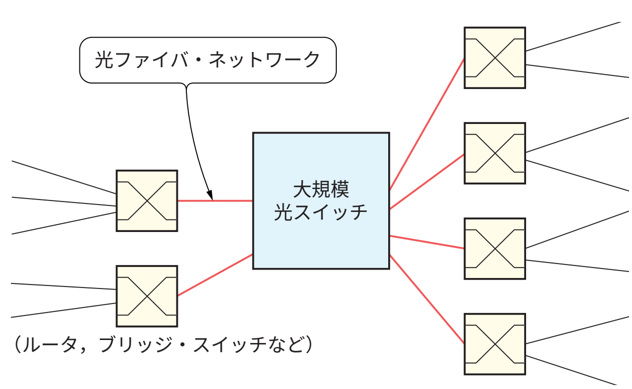


図2　多入力多出力光スイッチの使用例

大規模光ファイバ・スイッチが光ファイバ幹線に設置された例を示す．

注1：ここでスイッチとは，電気信号であれ光信号であれ，入力を特定の出力へ「誘導する」ものを指す．

COLUMN 大規模光スイッチの使われかた

本稿で紹介するスイッチは，ネットワーク系の基幹スイッチ以外にもさまざまな用途があります．

例えば，ネットワーク関連の機器を設計・製造している会社では，設計したネットワーク製品（ルータなど）をテストする必要があります．テストを実施するにあたり，社内のテスト・ネットワーク上にその機器を装着するわけですが，機器によってテスト・ネットワークの再構成が必要になります．従来，このネットワーク再構成を人手で実施してきましたが，これは非常に時間がかかり，かつ潜在的にエラー（配線ミスなど）が生じやすい作業です．大規模光スイッチを導入することで，人手で行っていたネットワークの構成作業を自動化できるようになります．

実際，テスト関連市場は光スイッチの有望なアプリケーションになっています．

（fiber-to-fiber）型の光対光スイッチです．これは，入力側の光ファイバの光信号を光のまま何の変更も加えず，出力側の光ファイバにスイッチングします（上掲のコラム「大規模光スイッチの使われかた」を参照）．

図3に示すように，その原理はいたってシンプルです．2本の光ファイバと2枚のレンズ，2枚のミラーによる光伝達パスを介して光を伝えていきます．スイッチ路中，2枚のミラーの角度を調整することで入力光ファイバからの光をターゲットとする光ファイバに伝える（誘導する）わけです．光の持つ直進性を考えると，ミラーで反射させることで光を目的の場所に誘導できることがわかります．

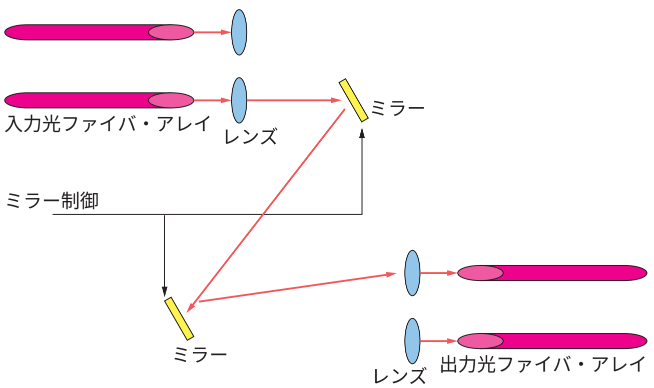


図3　光・電気変換を施さず，ファイバ・ツー・ファイバで光を伝達する原理図

レンズを通してミラーに焦点を合わせ，2枚のミラーの角度を調節することで光を反射させ，出力側のレンズに光を伝送する．出力側のレンズは伝送された光を光ファイバに伝える．この例では，ミラーの傾きを調整することで出力ファイバを選択するが，別の方法として，ミラーを固定して光ファイバ（とレンズ）を動かすことでミラーを選択してスイッチングするという方法もある（大規模スイッチでは一般的ではない）．

● スイッチ路における損失を抑えることが重要

さて，スイッチ内では光を光のまま（増幅などを施さずに）出力側へ誘導すると，スイッチ・ロス（損失）が生じます．この損失は，だいたい2dB以上になります．この損失をインサーション・ロス（insertion loss）と呼ぶこともあります．

微妙な光の回折（レンズ，ミラー部など）が損失の主要因となります．**図3**の構造では，2枚のミラーがスイッチ部になるので，2枚のミラーを適切に制御することで光ファイバ，レンズ，ミラーのアラインメント（整合）を調整し，損失を最小にする必要があります．この制御技術は，スイッチを開発している各社の企業秘密になりますが，実際に損失を2dB以下に抑えた製品を開発しているメーカもあります．衛星通信や宇宙通信などにおける（地上に設置した）アンテナ制御技術を応用しているメーカもあります．実際，シリコンバレーで光スイッチ・システムを開発している会社には，以前，NASA（米国航空宇宙局）などで衛星通信のアンテナ制御システムを開発していた技術者が何人も就業していると聞きます．

多入力多出力スイッチではミラーや光ファイバの物理的位置，個々のミラーやレンズの製造時の誤差などによって，個々の光伝送路の損失が違ってきます．

通常，システムは仕様で定めた個数以上のスイッチを用意し，装置ごとに最適な（損失が最小となる）伝送路を選択するように設計します．もっとも，スイッチ・ロスが多少大きいとはいえ，スイッチとして使用できないわけではありません．通常の場合は損失が大きいスイッチは用いませんが，例えばあるスイッチ路が故障したときなどはバックアップとして一時的に使用することはできます．

● 固定ミラーと可動ミラーを組み合わせて光路を作る

ここでは，MEMS技術を利用した可動式ミラーを使ってスイッチングする光スイッチを紹介します．このほかのスイッチング方法としては，ミラーを固定し，光ファイバを動かしてスイッチングするという方法があります．この方法は，

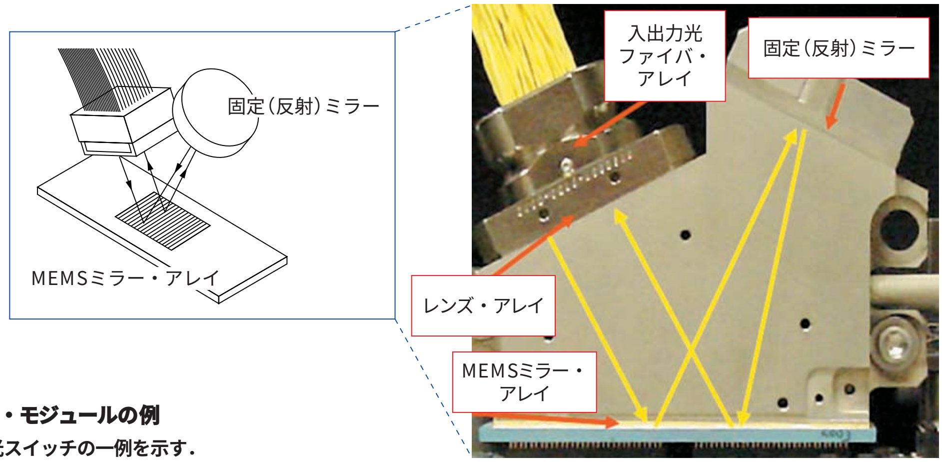
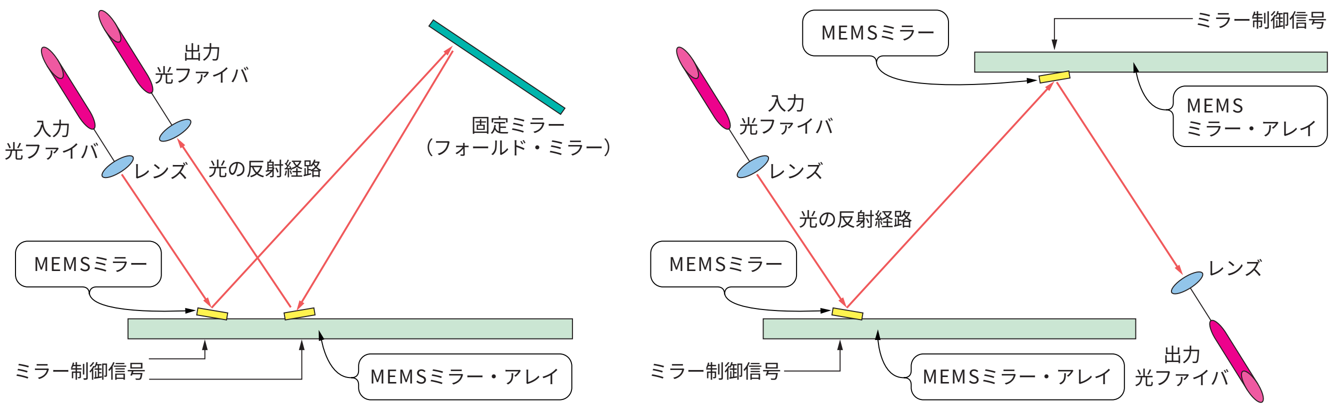


図4
MEMS ミラー・アレイを使った光スイッチ・モジュールの例
MEMS ミラー・アレイを用いた多入力多出力光スイッチの一例を示す．



（a）基本的な構造　（b）入出力光ファイバの数が多い場合のスイッチ構成例

図5　MEMS ミラー光スイッチの構造図
光を光のままスイッチングするMEMS ミラー・アレイの構造を示す．入出力光ファイバの数は複数（例えば32×32）．ミラー基板には，非常にたくさんのMEMS ミラーが並んでおり（ミラー・アレイ），それぞれの傾き角度を独立に制御できる．（b）に，入出力光ファイバの数が多い場合のスイッチの構成例を示す．2枚のMEMS ミラー・アレイを使って光路を形成する．固定ミラーは不要．

多入力多出力のスイッチ構成が複雑になります．現在のところ，16×16程度の構成をとった製品があるだけです．

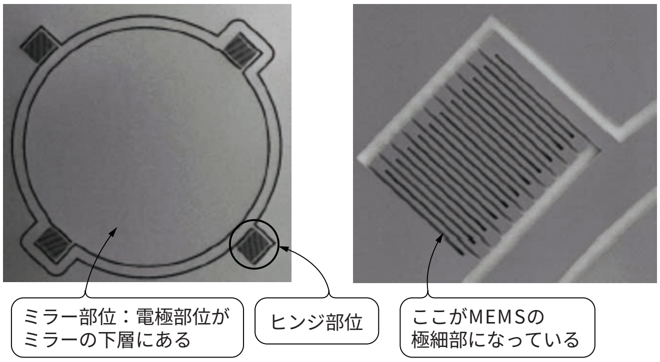
図4に多入力多出力光スイッチの一例を示します．このスイッチの構造を簡単に示したのが**図5**です．

このスイッチの光伝送路は，MEMSで構成したペアの可動ミラーと1枚の固定ミラー（フォールド・ミラー），光ファイバ，そしてレンズから構成されています．**図3**に示したように固定ミラーは原理上必要ないのですが，**図5（a）**の場合は1枚のMEMSアレイ・ユニットを使ってスイッチを構成するため，光伝送路として3枚のミラーを使っていることになります．入出力のポート（光ファイバ）の数が多くなった場合，2枚のMEMSアレイ・ユニットを用いてスイッチ・マトリックスを構成するかもしれません．その場合，固定ミラーは必要なくなります．2枚のMEMSアレイ・ユニットを**図5（b）**に示すような光路が構成できるように配置すればよいのです．

光伝送路はいたってシンプルです．入力光ファイバの光は，まずレンズを通ってMEMSミラーで反射します．反射光は固定ミラーで反射して，もう一方のMEMSミラーに伝わります．そのミラーで再度反射した光は，レンズを通って出力光ァイバに伝わります．ここで，2枚（1対）のMEMSミラーの角度を調整すれば，入出力ファイバ間の光路ができます．

2 光スイッチの制御方法

図6に，MEMSで製造したミラーの拡大図を示します．このミラーはSOI（silicon on insulator）基板を微細加工（こ



（a）MEMSミラー
（4点の端子はヒンジ部位）

（b）ヒンジ部位の拡大写真

図6　MEMSミラー（拡大図）

ミラーには90 °ごとにヒンジ部が付いている．(a)の4点の端子はヒンジ部位．(b)はそのヒンジ部位の拡大図．ヒンジ部はMEMSにおける最小寸法になっている．ミラー部とヒンジ部は物理的に同じ厚さになる．

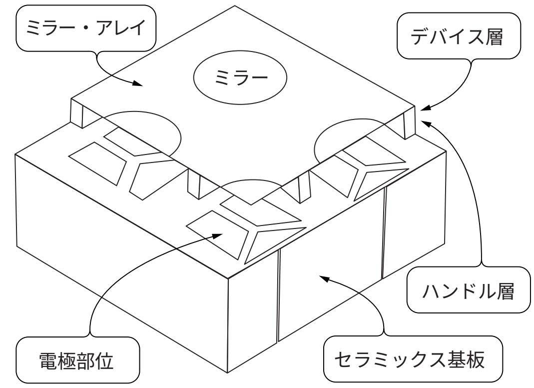


図7　MEMSミラーの構造図（模式図）

ハンドル層は，ミラーとヒンジ部を支えると同時に，ミラーとヒンジ部を電極から絶縁する役目も果たしている．電極部は，MEMSレンズ・アレイの基板であるセラミックス上に形成される．

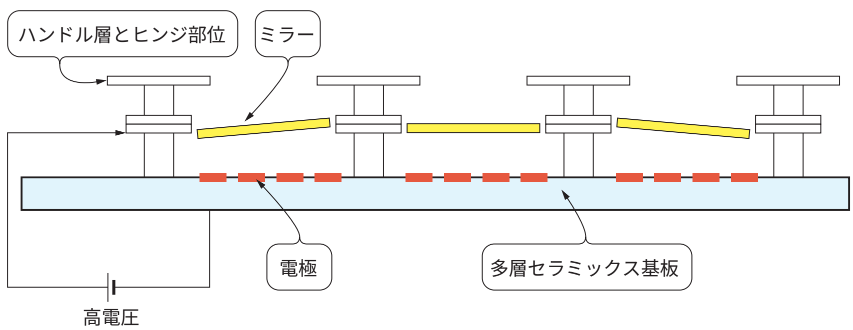


図8
MEMSミラー・アレイ（ダイ）を横から見た模式図

一つのミラーに4点（90 °ずつ）電極を持たせて電圧をかけることで，ミラーを微妙に傾かせる（傾き角度は微々たるもので，機械的強度上問題にならない）．アレイ上のミラーは個別に制御できる（スイッチングはミラーのペアで行う）．

の場合は研磨）することで形成しています．

ミラーには90 °ごとにヒンジ部が付いています．**図6(b)**はそのヒンジ部の拡大図です．ヒンジ部はMEMSにおける最小寸法（極細部）になっています．ミラー部とヒンジ部は物理的に同じ厚さになります．そして，このミラーとヒンジ部を支えるのがハンドル層（handle layer）です．ハンドル層はミラー，ヒンジ部を電極から絶縁する役目も果たしています．電極部は，MEMSレンズ・アレイの基板であるセラミックス上に形成されます．**図7**の例では，**図6**に示したミラーがアレイ上にたくさん形成されてMEMSスイッチを構成しています．このミラーの仕様は本稿では触れませんが，仕様ではミラーの厚さや直径，傾き（tilt）角度，アレイの配列間隔などが規定されています．

●「可動部を持つ＝壊れやすい」とはかぎらない

図8に，このMEMSスイッチを横から見た場合の構造を示します．ミラー直下の電極には，それぞれ電圧（250V近い高電圧）が印加され，ミラーの傾きを制御します．また，一つ一つのミラーは独立に制御されます．電極に電圧を印加することで，ミラーが微妙に傾きます．4極のヒンジがあるので，*X*-*Y*軸のどの方向にも傾くことができます．

ところで，MEMSミラーというと，何十度もミラーが傾くのではないかと思われがちですが，この傾きは非常に微々たるものです．機械的強度などによって最大傾き角が規定されます．MEMSミラーの機械的強度は非常に高く，MEMSミラー・アレイ・スイッチ装置の中でもっともじょうぶな部位の一つとなっています．

実際の装置のMEMSミラー・アレイとほかの部位が故障（defect）する確率をストレス・テストやエージング（経年変化）テストなどで測定してみると，電源部や制御系など，電気的な部分が先に壊れるという結果が出ています．それでも，「可動部＝壊れやすい，もろい」と思われる方が多く，MEMSでスイッチを構成していない（可動部を持たない）ことを売り文句にするスイッチ・メーカもあるようです．

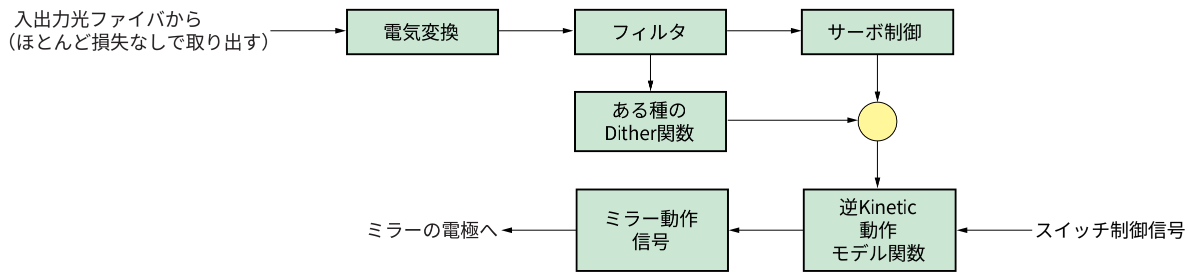


図9　ミラー制御系の簡単化したモデル

スイッチ制御信号は，別系統（電気系統）を介して送られてくる．スイッチ動作が完了した後，実際の情報伝送が始まる．この場合，ファイバ・ツー・ファイバ型スイッチはパケット交換と異なり動的に入力データのヘッダ情報に基づくスイッチング動作を行わない．スイッチング速度は約10ms～50ms．光ファイバの光を取り込み（制御系の入力），遅延，振動などをモデル化したサーボ制御経路を介してミラーの動作を制御する．電極を操作することで，フィードバック制御系を構成する．

MEMSミラー・アレイ基板は，非常に高価です（4,000ドル程度）．とても高価なセラミックス基板を使っていることが，その理由の一つです．また，半導体メモリのように大量生産するようなデバイスではなく，いわゆる量産効果も期待できません．装置中でもっとも高価な部品がこのデバイスであるというケースも実際にあります．

● 数mVの精度でミラーの傾きを制御

上述したデバイスのミラーの傾きは，ミラー直下の電極に印加する電圧で制御します．ミラーは*X-Y*軸で制御できます．

電極には高電圧（最大250V程度）がかかります[注2]．印加電圧はD-Aコンバータで制御されています．D-Aコンバータの解像度は16ビット程度です．ということは，このミラー・アレイの傾き制御は，数mVの精度で行われることになります．高電圧を印加しますが，ミラーに流れる電流は非常に少ないため，消費電力はせいぜい数mW（1光路当たり）です．

このデバイスは，1対のMEMSミラーを調整してスイッチングを行います．その制御経路（電気系統）の概略を**図9**に示します．スイッチング信号は光信号と別に伝達されます．いわゆる回線交換システムにおけるパケット交換のように，情報に付加したアドレスなどをもとにスイッチングする方式とは異なります．実際の情報伝送（光情報）はスイッチングが完了した後に始まります．これは，いわば電話のようなものです．電話通話ではダイヤルして通話可能になってから初めて実際の会話（情報伝送）が行われます．このスイッチングに必要な時間はmsオーダ（10ms程度，またはそれ以上）です．（筆者は実際に見たことはないが）MEMSを用いない機械式光スイッチでは1s以上必要となるそうなので，格段に速くなったと言えます．

図9に示した制御部は，おもにDSP（digital signal processor），センサ，D-Aコンバータから構成されています．スイッチ指令（外部からの信号）により，DSPがD-Aコンバータを制御します．各ミラーを傾かせたい角度に応じて，電極（ミラー当たり3～4電極）に印加する電圧があらかじめ計算され，記憶されています．そのため，その値までは急速に電圧を印加することができます（オープン・ループでフィードバック制御不要）．ただし，ミラー制御の最終段階ではスイッチ・ロスを最小にするためのフィードバック制御が必要になります．つまり，入出力光ファイバの信号をモニタしてミラーを微調整するのです．光信号をモニタするということは，そのこと自体に損失（モニタリング・ロス）を伴いますが，この損失はスイッチ・ロスと比較して誤差の範囲に入る程度の値になります．

スイッチングが終了した後（電極への電圧が最終的に確定して安定した状態），通常，光信号はモニタリングを続けます．モニタリングに伴う損失はスイッチ・ロスとして織り込み済みなので，仕様上の値を逸脱することはありません．

● 光MEMSスイッチを使った通信装置の製品化が間近

本稿では，MEMS技術の応用事例としてファイバ・ツー・ファイバ型光スイッチを紹介しました．このタイプの光スイッチを使用した装置の通信ネットワークへの導入が急ピッチで始まっています．小規模な構成（16×16）から大規模な構成（1,024×1,024）まで，さまざまな規模の光スイッチ装置が開発されています（右掲のコラム「現実味を帯びてきた“大規模”光スイッチ装置」を参照）．

注2：大規模スイッチということでミラーの数も多く，250Vという高い電圧を印加しないとミラーを制御できない．

COLUMN 現実味を帯びてきた“大規模”光スイッチ装置

1990年代のIT（information technology）バブルのさなか，電話会社をはじめ，通信・ネットワーク関連会社（事業者，機器メーカ，半導体メーカなど），研究機関（大学など），ファイナンス関係者（投資家）は，通信需要の増大とそれに伴うインフラ整備が急ピッチで進むだろうと予想しました．とくに，光ファイバ網の整備が進み，それによって光スイッチ装置などの需要が急増すると…．

実際，この時期は光スイッチ装置の市場は盛況でした．ネットワークの需要が爆発的に増大するのに伴って，通信会社の投資額もうなぎのぼりに上昇しました．

こうした中，将来的に“超大規模”光スイッチが必要になるという予測が立てられました．そこで，ベンチャ企業，大企業ともにその“超大規模”光スイッチの開発にリソース（人材と資本）を投入したと聞きます．

この“超大規模”光スイッチを実現するため，ベンチャ企業はMEMS技術を使った光スイッチの開発を進めました．実際，1,024×1,024といった巨大なMEMSベースの光スイッチ・モジュールを開発した会社もあります（現在，その会社は存在しない）．1,024×1,024というのは非常に巨大な構成ですが，筆者は2,048×2,048構成のスイッチ・モジュールを開発した（しようとしていた？）人物に会ったこともあります．

残念ながら，こうした“超大規模”光スイッチの開発に携わった会社は，そのほとんどが現在，存在しません（ITバブルがはじけて泡となって消えていった…）．しかし，技術者がいなくなったわけではありません．より現実を見据えた経営者や投資家の下で，現在の（あるいは近い将来の）ニーズに合わせた製品の研究開発に従事しているのです（とはいえ，やはり“超大規模”光MEMSスイッチの製品レベルでの開発は行いたいだろうが…）．

ITバブルのはじけた現在，ようやく大規模光スイッチ（といってもだいたい32×32構成，大きくても256×256程度の構成）の需要が出てきているところです．

先ごろ（2005年3月6日～11日），米国カリフォルニア州Anaheimで開催された2005 Optical Fiber Communications Conference（OFC）でも，その程度の構成を持つスイッチ装置を出展する会社がいくつかありました（装置なので，モジュールを追加することでさらに大規模な構成にすることは可能）．装置のコア部分（スイッチング・モジュール）にはMEMS技術が広く採用されていました．筆者が見て回った範囲では，モジュールの構成は128×128程度までと，ITバブルのころと比較して現実的な規模になってきたという印象を受けました．

可動ミラーを用いたスイッチが主流となりつつありますが，これが光MEMSの重要なアプリケーションとなっていくと考えられます．本稿で挙げた例は，その一つにすぎません．原理そのものにはあまり違いはありませんが，実際にはミラーの構成方法によっていくつかの異なった装置が開発されています．

ここでは，光を光のままスイッチする例を挙げましたが，1本の光ファイバにいくつもの波長が光多重されるのが普通です．この多重化された光を波長ごとに個別に誘導する光スイッチ（wave length switching）の開発も始まっています．小規模な構成（2×2，4×4）では，いくつか製品レベルにあるものもあります（それらは，かならずしもMEMS技術を使っているわけではないが…）．

今後，ネットワークのインフラを支える重要な技術として，光MEMSから目が離せない状況になってきていると言えます．

とうはら・ともなり

<筆者プロフィール>
東原朋成．米国在住16年．フルカスタムVLSIの設計エンジニアを皮切りに，現在はCPUとそのアプリケーションの開発を手がけるシステム・エンジニア的な業務に従事．一時期，開発グループ兼プロジェクト・マネージャとして設計チームを率いていたが，開発の一線に戻るべく現在の会社に転職．CPUとビデオ（圧縮）が専門．かたわら，ボランティア的に知人の会社のアドバイザを数社で務める．キャリアアップの観点から社会人学生としてMBA課程，博士課程にも席を置く典型的なエンジニア．MEMS光スイッチについては，友人がCEOを務める会社のボード・オブ・アドバイザのメンバとしてかかわっている．

2